Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 14, No. 4, Winter 2023, p. 751-768

Estimation of Water Requirement and Wheat (Triticum aestivum L.) Yield under the Impact of Climate Change

Mojgan Ahmadi [1] and Hadi Ramezani Etedali [2*]

Received: 24-01-2021
Revised: 20-06-2021
Accepted: 01-09-2021
Available Online: 01-09-2021

How to cite this article:
Ahmadi, M., and Ramezani Etedali, H., 2023. Estimation of water requirement and wheat (Triticum aestivum L.) yield under the impact of climate change. Journal of Agroecology 14(4): 751-768.
DOI: 10.22067/agry.2021.68517.1015

Introduction

Crop production is directly dependent on climatic conditions, and climate determines the sources of production and productivity of agricultural activities. Therefore, long-term forecasting of climate variables and taking the necessary measures to mitigate the adverse effects of climate change have been considered by many researchers around the world. Climate change affects water requirement and crop yields in the future, so it is important to study changes in meteorological parameters and their impact on water requirement and crop yields in each region. So, in this study, the effect of climate change on the yield and water requirement of wheat in Qazvin synoptic station was investigated.

Materials and methods

In this study, the results of the scenarios were compared with the data of Qazvin station for wheat crop by statistical error criteria including Explanation coefficient statistics (R^2), root mean square error (RMSE) and maximum error (ME). For evaluation, from the general circulation models in the LARS-WG model (EC-Earth, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-MR) and the scenarios of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 in the baseline 1986-2015 was used. Yield and water requirement of wheat in the baseline and future periods 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 and 2081-2100 were calculated with Aqua Crop software.

Result and discussion

The coefficient of explanation for the maximum and minimum temperatures simulated with the LARS-WG model shows that the simulated data and the synoptic station data are highly correlated. An explanation coefficient greater than 90% indicates that more than 90% of the variance in the minimum and maximum temperature data of the synoptic station is described by the LARS-WG model data. The value of RMSE at the minimum and maximum temperature is less than 3 °C, which indicates the low temperature deviation simulated with the LARS-WG model compared to the actual temperature. The ME index value was obtained for the minimum temperature equal 6.93 °C and for the maximum temperature equal 7.76 °C. The coefficient of explanation for the precipitation simulated with the LARS-WG model shows that the simulated data and the data of the synoptic station do not have a high correlation and the coefficient of explanation decreases to less than 0.5. The values of RMSE and ME were 33.28 mm and 183.10 mm, respectively. The results show that the model is more accurate in simulating minimum and maximum temperatures than precipitation. In a study, Goudarzi et al. (2015) investigated the performance of LARS-WG and SDSM microscopic exponential models in simulating climate change in the catchment area of Lake Orumieh. The results showed that both models are more accurate in simulating temperature than precipitation, which is consistent with the

1- Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
(*- Corresponding author's Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

results of the present study. The average wheat yield for the baseline was 7.67 (tons/ha). The yield average will increase in future periods, which is the highest in the HadGEM2-ES model with the RCP8.5 scenario and the period 2081-2100. Water requirement was obtained in the baseline 127.14 mm. The water requirement average will decrease in future periods.

Conclusion

The simulation results of the LARS-WG model in the baseline showed that the model has more accurate in the simulation of minimum temperature (Tmin) and maximum temperature (Tmin) than precipitation. This study findings have also showed that the temperature will increase in future periods. Precipitation changes were seen as both decreasing and increasing trend. The yield increased in future periods, which is the highest in the HadGEM2-ES model with the RCP8.5 scenario and the period 2081-2100. The water requirement decreased in future periods**.**

Keywords: Aqua Crop, General Atmospheric Circulation Models, LARS-WG Model, RCP Scenarios.

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

برآورد نیاز آبی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت قزوین)

مژگان احمدی[1] و هادی رمضانی اعتدالی[2]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

احمدی، م.، و رمضـــانی اعتدالی، ه.، ۱۴۰۱. برآورد نیاز آبی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت قزوین). بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۴): ۷۶۸-۷۵۱.

چکیده

در عصر حاضر، تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در توسعه پایدار، کشاورزی و امنیت غذایی مطرح می‌باشد. گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصـــولات مهم و اســـتراتژیک در جهان و ایران محســـوب می‌شـــود. به همین منظور، در این پژوهش به تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد و نیاز آبی گندم آبی در دشـت قزوین در دوره‌های آتی پرداخته شـده اسـت. برای ارزیابی، از مدل‌های گردش عمومی موجود در مدل LARS-WG (EC-Earth، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIROC5، MPI-ESM-MR) و سـناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره پایه ۲۰۱۵- ۱۹۸۶و در دوره‌های آتی۲۰۴۰- ۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰- ۲۰۶۱ و ۲۱۰۰- ۲۰۸۱ اسـتفاده شـد. نیاز آبی و عملکرد گندم در دوره پایه و دوره‌های آتی با نرم‌افزار Aqua Crop محاسبه شد. در این پژوهش، نتایج حاصل از سناریوها با داده ایستگاه قزوین برای محصول گندم، توسط معیارهای آماری خطا شامل آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، حداکثر خطا (ME)، مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی مدل LARS-WG در دوره پایه نشان داد که مدل در شبیه سازی دمای حداقل و حداکثر دقت بیشتری نسبت به بارش دارد. میانگین عملکرد گندم برای دوره پایه ۷/۶۷ (تن بر هکتار بر فصل) به‌دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میانگین عملکرد گندم در دوره‌های آتی افزایش می‌یابد که این میزان در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ و مدل HadGEM2-ES با سناریوی RCP8.5 بیشترین مقدار را دارد. میانگین نیاز آبی در دوره پایه ۱۲۷/۱۴ (میلی‌متر بر فصل) به‌دست آمد که این میزان در دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. بنابراین، پیش‌بینی افزایش عملکرد در دشت قزوین بیانگر آن است که این منطقه از پتانسیل مطلوبی در کشت و توسعه این محصول برخوردار خواهد بود که علاوه‌بر مساعد بودن شرایط اقلیمی، بهبود مدیریت و نهاده‌های کشاورزی نیز می‌تواند باعث افزایش عملکرد این محصول در طی سال‌های آتی گردد.

واژه‌های کلیدی: سناریوهای RCP، مدل‌های گردش عمومی اتمسفر، مدل LARS-WG، Aqua Crop

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران.
۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir)
DOI: 10.22067/agry.2021.68517.1015

مقدمه

تغییرات اقلیمی اخیر به‌طور گسترده بر اکوسیستم طبیعی تأثیر گذاشته است. اتمسفر و اقیانوس‌ها گرم‌تر شده‌اند، مقادیر برف و یخچال‌های قطبی کاهش داشته‌اند و سطح دریاها بالاتر آمده‌اند. ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب گرم‌تر شدن هوا وتغییرات بیشتری در مؤلفه‌های اقلیمی خواهد شد (IPCC, 2014).

امروزه، تغییر اقلیم و پدیده گرمایش، یکی از مباحث مهم و کلیدی است. تغیر اقلیم بر بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، جنگل‌داری، آب، صنعت، گردشگری، انرژی و غیره اثر می‌گذارد (Kemfert, 2009). تولید محصولات زراعی مستقیماً به شرایط اقلیمی وابسته است و اقلیم تعیین‌کننده منابع تولید و بهره‌وری فعالیت‌های کشاورزی است (Reilly, 1999). بنابراین، پیش‌بینی بلندمدت متغیرهای اقلیمی و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به‌منظور تعدیل اثرهای سوء ناشی از تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران جهان قرار گرفته است. به همین منظور، مدل‌های گردش عمومی جو توسعه یافته‌اند. در این مدل‌ها، شبیه سازی عنصرهای اقلیمی در مقیاس بزرگ مکانی و زمانی انجام می‌شود و برای استفاده این عنصرهای اقلیمی در مقیاس کوچک‌تر، می بایست خروجی این مدل ها با تکنیک های مختلف کوچک‌مقیاس شوند (Samadi et al., 2007). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به‌طور کلی، به دو دسته دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند. از مدل های ریزمقیاس دینامیکی می‌توان به MM5، REGCM3 و PRECIS اشاره کرد. برای انواع مدل‌های ریزمقیاس آماری می‌توان CLIGEN، LARS WG، ASD، USCLIMATE و SDSM را نام برد. روش آماری در مقایسه با روش دینامیکی، در مواقعی که هزینه کمتر و ارزیابی سریع‌تر عوامل مؤثر بر تغییرات آب و هوایی مورد نیاز باشد، مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری دارد (Zarei et al., 2019).

در زمینه مدل‌های ریزمقیاس نمایی و اثرات تغییر اقلیم پژوهش‌های متعددی در سطح جهانی صورت گرفته است. در مطالعه‌ای به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات کشاورزی پرداختند. نتایج نشان داد که در اثر تغییرات اقلیمی، عملکرد اکثر محصولات کاهش و هزینه‌های تولید افزایش می‌یابد (Azuara et al., 2011). پژوهشگران با استفاده از مدل SDSM تحت سناریوهای RCP به بررسی اثرات تغییر اقلیم در حوضه رودخانه خیانگ جیان چین پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره‌های آتی، میزان تبخیر تعرق پتانسیل در تمامی سناریوها افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش در سناریوی RCP8.5 مشاهده شد (Tao et al., 2015). محققان اثر تغییر اقلیم بر تقاضای آب کشاورزی تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در حوضه شانکسی در چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد، در دوره آتی درجه حرارت، بارش مؤثر و رطوبت نسبی افزایش و سرعت باد کاهش می‌یابد. همچنین نیاز آبیاری محصولات اصلی با توجه به بارش مؤثر روند نزولی دارد (Sun et al., 2018). در مطالعه‌ای، اثر تغییر اقلیم را بر هیدرولوژی و تولید محصول گندم (Triticum aestivum L.) در جنوب استرالیا بررسی کردند. نتایج نشان داد که با وجود کاهش بارندگی، محصول شبیه سازی شده کاهشی ندا شت (Ludwig & Asseng., 2008). در پژوهشی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید ذرت (Zea mays L.) در غنا پرداختند. نتایج نشان داد که متوسط عملکرد ذرت در افق ۲۰۳۰ تحت سناریوی RCP8.5، ۵۷ درصد افزایش خواهد یافت (Srivastava et al., 2018). در پژوهشی به تأثیر تغییر اقلیم بر بیلان آب و رواناب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز سد لتیان تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی Lars-WG پرداخته شد (Jalali et al., 2020). در پژوهشی، تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی و پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه نکا را طی دوره‌های آتی را تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 بررسی کردند (Babolhakami et al., 2020). در بررسی که در شمال شرق ایران در شرایط اقلیم با دو مدل اقلیمی HadCM3 و CGCM2 با دو سناریوی A2 و B2 صورت گرفت نتایج نشان داد، بین عملکرد دانه گندم دیم و بارندگی ارتباط مثبت و قابل توجهی وجود دارد و با افزایش بارندگی عملکرد دانه گندم نیز افزایش می‌یابد (Eyshi Rezaie & Bannayan, 2012). پژوهشگران تأثیر تغییر اقلیم را بر تولید گندم در مناطق اصلی تولید گندم در چین بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که عملکرد گندم دیم در مناطق شمال چین در آینده کاهش می‌یابد، در حالی که عملکرد در مناطق جنوبی افزایش نشان داد. همچنین در شرایط آبیاری کامل عملکرد گندم تا حدودی در بین همه مناطق تولید، افزایش یافت (Lv et al., 2013). در پژوهشی در شمال شرقی ایالات متحده، یک ارزیابی منطقه‌ای از عملکرد گندم با استفاده از مدل‌های اقلیمی به همراه دو سناریوی RCP انجام شد (Karimi et al., 2017). در این پژوهش پیش‌بینی شد که در دهه ۲۰۷۰ بارندگی و میانگین دما در طول دروه رشد گندم زمستانه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، نتایج شبیه سازی‌های این پژوهش افزایش عملکرد در کل منطقه را نشان دادند. در مطالعه‌ای در پاکستان به بررسی اثرات متغیرهای تغییر اقلیم بر تولید گندم پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که تغییر اقلیم، تولید گندم در پاکستان را تحت تأثیر قرار

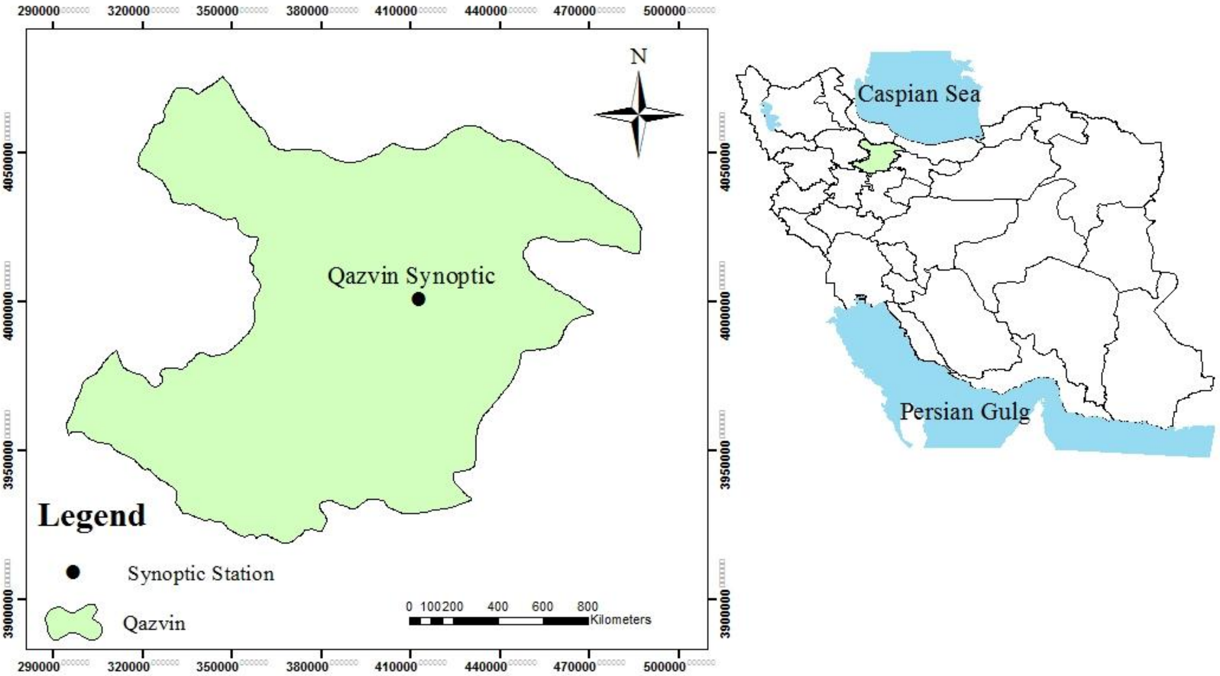
نمی‌دهد (Janjua et al., 2014).

در این پژوهش به بررســـی اثر تغیر اقلیم بر عملکرد و نیاز ابی گندم در ایســـتگاه ســـینوپتیک قزوین با اســـتفاده از مدل‌های گردش عمومی موجود در مدل LARS-WG (EC-Earth، GFDL-CM3، HadGEM2-ES،MIROC5 ، MPI-ESM-MR) و ســـناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره پـایـه ۲۰۱۵-۱۹۸۶و در دوره های آتی۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان قزوین با مساحتی معادل ۱۵۸۲۱ کیلومترمربع به‌ترتیب بین طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۵۰ در جه و ۳۵ دقیقه و ۳۵ در جه و ۱۸ دقیقه در حوزه مرکزی ایران واقع شده است. موقعیت استان قزوین در شکل ۱ نشان داده شده است. میانگین بارش سالانه در سطح استان از ۲۱۰ میلی‌متر در بخش‌های شـــرقی تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شـــمال شـــرقی متغیر اســـت. در این مطالعه از داده‌های ایســـتگاه ســـینوپتیک قزوین اســـتفاده شـــده اســـت. طول جغرافیایی این ایســـتگاه ۵۰/۰۳ و عرض جغرافیایی آن ۳۶/۱۵ و ارتفاع آن ۱۲۷۹/۲ می‌باشد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه
Fig. 1- Study area

برآورد تبخیر تعرق مرجع

مدل تبخیر تعرق هرگریوز-ســـامانی برای محاســـبه تبخیر تعرق روزانه نیازی به اطلاعات گســـترده ندارد. در پژوهشـــی که به ارزیابی روش‌های تبخیر و تعرق پتانسیل در د شت قزوین پرداخته شد، نتایج نشـــان داد که روش هارگریوز ســـامانی با r=۰/۸۷ و RMSE =۰/۳۴ میلی‌متر در روز بهترین روش برای برآورد تبخیر تعرق پتانســـیل در دشت قزوین است (Nazari & Kaviani, 2016). همچنین این مدل در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر محصولات کشاورزی در مطالعات سایر محققان (Nikbakhtshahbazi, 2018; Koohi et al., 2020) مورد اســـتفاده قرار گرفته اســـت، به همین منظور، این مدل برای محاســـبه تبخیر تعرق روزانه محصـــول گندم برای دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۶۸) و دوره‌های شبیه سازی شده انتخاب شده است. مدل هارگریوز سامانی برای برآورد تبخیر تعرق روزانه در معادله ۱ آورده شده است.

$$ET_0 = 0.0135 K_T R_a TD^{0.5}(T + 17.8)$$ معادله (۱)

$$K_T = 0.00185 TD^{0.5} - 0.0433 TD + 0.4023$$ معادله (۲)

$$TD = T_{max} - T_{min}$$ معادله (۳)

که در آن، T_{min} و T_{max}: به‌ترتیب حداقل و حداکثر دمای هوا در

دوره مورد نظر بر حسب درجه سانتی‌گراد، R_a: تابش خورشیدی در بالای جو و K_T: ضریب تصحیح است.

معرفی مدل Aqua Crop

مدل گیاهی Aqua Crop عملکرد قابل انتظار محصول را تحت رژیم‌های آبیاری مختلف شبیه‌سازی می‌کند (Soria-Ruiz et al., 2012). Aqua Crop مستقیماً عملکرد محصول و آب مصرفی را مرتبط کرده و مقدار تولید زیست‌توده حاصل از تعرق واقعی محصول را بر اساس پارامتر بهره‌وری که هسته اصلی Aqua Crop است تخمین می‌زند (Steduto et al., 2012). مدل Aqua Crop همانند مدل‌های crop wat و Budget از معادله دورنبوس و کاسا که در نشریه ۳۳ فائو برای محاسبه ضریب حساسیت کم‌آبی بر اساس تعیین نسبت تبخیر- تعرق نسبی و عملکرد نسبی بیان شده است، استفاده می‌کند و هر سه مدل بر اساس معادله بیلان آب عمل می‌کنند.

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad \text{(۴) معادله}$$

که در آن، Y_x: عملکرد بیشینه، Y_a: عملکرد واقعی، ET_x: تبخیر-تعرق بیشینه، ET_a: تبخیر-تعرق واقعی و K_y: ضریب حساسیت به کم آبی (ضریب واکنش عملکرد به آب) می‌باشد. $(\frac{Y_x-Y_a}{Y_x})$: معرف کاهش محصول و $(\frac{ET_x-ET_a}{ET_x})$: بیان‌کننده تنش آبی است.

مدل با تفکیک تبخیر-تعرق (ET) به تعرق از گیاه (Tr) و تبخیر از سطح (E) و بسط مدل رشد اولیه[1] تا پیری پوشش گیاهی[2]، برآورد و پیش‌بینی عملکرد به‌عنوان تابعی از زیست‌توده نهایی[3] و شاخص برداشت و تفکیک تنش آبی در چهار بخش: رشد پوشش تاجی، پیری پوشش تاجی گیاه، تعرق از سطح گیاه و شاخص برداشت محصول (HI[4]) توسعه یافته است (Steduto et al., 2009).

برآورد تعرق گیاه (Tr)، سبب تفکیک مصارف مفید و غیرمفید می‌شود. تعرق روزانه به‌واسطه تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه (ET_0) و بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP*) مطابق با معادله ۵ به زیست‌توده گیاهی یا قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود.

$$B_i = WP \times \left(\frac{Tr}{ET0}\right) \quad \text{(۵) معادله}$$

WP* بهره‌وری آب نرمال شده و مقدار آن برای گیاه مشخص در شرایط اقلیمی مشابه، ثابت است و پس از نرمال کردن بهره‌وری آب برای شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود. مزیت معادله مورد استفاده در مدل Aqua Crop این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه در این نرم‌افزار با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، در حالی که در معادله ۴، شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه یا فصلی و بر اساس ضریب K_y است.

از دیگر ویژگی‌های مدل این است که به‌جای شاخص سطح برگ از پوشش سبز سطح پوشاننده زمین استفاده می‌کند، که در آن شاخص درجه روز رشد اهمیت ویژه‌ای دارد و به‌جای ضریب کاهش عملکرد محصول به بررسی شاخص بهره‌وری می‌پردازد. این مدل در دامنه وسیعی از محصولات زراعی همچون: علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه، روغنی و غده‌ای قابل استفاده است (Steduto et al., 2009).

در تمام دوره رشد گیاه، مقدارآب ذخیره شده در ناحیه ریشه از طریق بیلان آبی جریان ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر- تعرق) در ناحیه ریشه شبیه‌سازی می‌شود. شدت ضرایب تنش آبی (Ks) مؤثر بر توسعه پوشش تاجی (CC)، شدت تعرق، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت (HI) به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. به‌علاوه برخی جنبه‌های مدیریتی آبیاری و زراعی از طریق تأثیراتی که بر توسعه ریشه گیاه، بهره‌وری آب و تعدیل محصول به تنش دارند، بیان می‌شوند. در نهایت، مقدار عملکرد محصول با استفاده از جرم قسمت هوایی پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و شاخص برداشت تعدیل شده محاسبه می‌شود.

معرفی مدل LARS-WG

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اقلیم آینده، استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو می‌باشد. این مدل‌ها، معتبرترین ابزار برای بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف محسوب شده و قادرند پارامترهای اقلیمی را برای یک دوره طولانی‌مدت بر اساس سناریوهای تأیید شده IPCC مدل‌سازی نمایند (Khaliliaqdam et al., 2012). گروهی از این مدل‌ها، اطلاعات مفیدی درباره پاسخ جو به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کنند. با توجه به وضوح مکانی کم در مدل‌های گردش عمومی جو، به ناچار مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی پیشنهاد شدند. این مدل‌ها با استفاده از خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی و به کارگیری سناریوهای اقلیمی، داده‌های گردش عمومی در مقیاس درشت را به مقیاس‌های ریزتر تبدیل می‌کنند. روش‌های متداولی برای ریزمقیاس‌نمایی وجود دارد که شامل استفاده از سلول اصلی یا روش

1- Initial
2-Senescence
3- Biomass = B
4 -Harvest Index

تناسـبی[1]، روش‌های آماری[2] و روش‌های دینامیکی[3] می‌باشـند. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی نیاز به سـخت‌افزارهای قوی داشـته و زمان‌بر می‌باشـند. در مقابل، مدل‌های آماری ارزان‌تر بوده و سـرعت بالاتری دارند. می‌توان از مدل‌های آماری بدون نیاز به ابررایانه‌ها و یا رایانه‌های سریع استفاده کرد.

از جمله مدل‌های آماری، مدل LARS-WG می‌باشـد. این مدل مولد آب و هوایی بر پایه روش سـری‌ها اسـت که می‌تواند به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیمی فعلی و آینده اسـتفاده شـود. نسـخه اولیه این مدل در بوداپسـت مجارستان در سال ۱۹۹۱ به‌عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک‌های کشـاورزی توسـط Racsko و همکاران ابداع شـد. سـپس توسـط Semenov و Barrow ارتقا یافت. کارایی دو مدل LARS-WG[4] و WGEN[5] در ۱۸ ایستگاه آمریکا، اروپا و آسیا بررسی و معلوم شد که مدل LARS نتایج بهتری تولید می‌کند.

در مدل LARS-WG، مدل‌سـازی بارش و احتمال وقوع آن از روش توزیع نیمه‌تجربی و زنجیره‌ی مارکف، مدل‌سـازی تابش بر اساس توزیع نیمه‌تجربی و مدل سازی دما با استفاده از سری فوریه انجام می‌شـود. در گزارش پنجم تغییر اقلیم مدل‌های گردش عمومی مختلفی ارائه شـده اسـت. نام این مدل‌ها به همراه مرکز ارائه‌دهنده و سناریوهای موجود در مدل LARS-WG به شرح جدول ۱ می‌باشد:

سناریوهای واداشت تابشی[6] تغییر اقلیم

سـناریوهای تغییر اقلیمی ارائه شـده در گزارش پنجم به‌صـورت RCP نمایش داده می‌شـوند که نماینده‌های خطوط سـیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای هسـتند. سـناریوهای به‌کار رفته در مدل LARS-WG دارای تعاریفی به شرح ذیل هستند:

RCP2.6: به‌معنای کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن می‌باشد. مطابق این سناریو حداکثر مقدار انرژی تابشی قبل از سال ۲۱۰۰ به‌حدود ۳ وات بر مترمربع می‌رسد. همچنین، انتشار گاز کربن دی اکسید از سال ۲۰۲۰ کاهشی و تا سال ۲۱۰۰ به صفر خواهد رسید. میزان انتشار گاز متان نیز تا سال ۲۱۰۰ به نصف مقدار موجود در سال ۲۰۲۰ تقلیل می‌یابد. همچنین اکسید سـولفور به ۱۰ درصـد مقدار موجود در دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ کاهش می‌یابد. در صورت وقوع سناریوی RCP2.6 افزایش دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ در حدود زیر دو درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

RCP4.5: به‌عنوان سناریوی متوسط شناخته می‌شود که انرژی تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ میلادی به ۴/۵ وات بر مترمربع خواهد رسید. آستانه این سناریو برای انتشار گازهای گلخانه‌ای در حدود سال ۲۰۴۰ میلادی اتفاق می‌افتد و بعد از آن به‌صـورت کاهشـی اسـت. به‌طور جزئی‌تر، دی اکسـید کربن تا سـال ۲۰۴۵ میلادی شـروع به کاهش می‌نمایند و تا سال ۲۱۰۰ مقدار آن به نصف مقدار سال ۲۰۵۰ خواهد رسید. همچنین افزایش انتشار گاز متان تا سال ۲۰۵۰ متوقف شده و مقدار آن رفته رفته به ۷۵ درصـد سـطح متان موجود در سـال ۲۰۴۰ می‌رسد. مقدار سطح گاز دی اکسید سولفور نیز به ۲۰ درصد آنچه که در دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ بوده، خواهد رسـید. برای تحقق سـناریوی RCP4.5 انتشـار منفی گاز دی‌اکسـید کربن همانند جذب توسـط درختان باید در حدود دو گیگاتن در سال باشد.

جدول ۱- مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای تغییر اقلیمی موجود در مدل LARS-WG

Table 1- Atmospheric circulation models and climate change scenarios in LARS-WG model

نام مدل گردش عمومی General circulation model name	نام مرکز ارائه‌دهنده Name of provider center	سناریوهای تغییر اقلیم Climate change scenarios		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
EC-Earth	European community Earth-System			
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory			
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environment			
MIROC5	International Center for Earth Simulation			
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology Earth System			

1- Proportional downscaling
2- Statistical downscaling
3- Dynamical downscaling
4- Long ashton research station weather generator
5- Weather generator
6- Representative concentration pathways

در صـورت وقوع این سـناریو میزان افزایش دمای تا سـال ۲۱۰۰ بین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بوده و افزایش سطح دریا حدود ۳۵ درصد بیشتر از سناریوی RCP2.6 خواهد بود. با این‌حال، بسیاری از درختان و گونه‌های جانوری قادر به ادامه حیات تحت این سناریو نخواهند بود.

RCP8.5: این سـناریو به‌عنوان بدترین حالت وقوع تغییر اقلیمی شـناخته می‌شـود. زیرا انتشـار گازهای گلخانه‌ای در آن طی قرن ۲۱ به صورت پیو سته افزایش یافته، به‌گونه‌ای که انرژی تاب شی به حدود ۸/۵ وات بر مترمربع قبل از سال ۲۱۰۰ خواهد رسید.

شاخص‌های آماری

در این تحقیق، نتایج حاصـل از سـناریوها با داده ایسـتگاه قروین برای محصـول گندم، توسـط معیارهای آماری خطا شـامل آماره‌های ضـریب تبیین (R^2)[1]، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)[2] و خطا (ME)[3] مقایسه شدند.

ضـریب تبیین یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر x و y اسـت که به‌صـورت بی بعد نمایش داده می‌شـود. این ضریب ارتباط مستقیمی با ضریب همبستگی دارد. به این ترتیب که با جذر گرفتن از ضریب تبیین می‌توان ضریب همبستگی میان دو سری مورد برر سی را به‌د ست آورد. همانند ضریب همب ستگی هر چه مقدار ضـریب تبیین به یک نزدیک‌تر باشـد، ارتباط قوی‌تری میان دو متغیر وجود دارد. در صورت ضرب ضریب تبیین در عدد ۱۰۰ مقدار به‌دست آمده بیان‌گر درصـد واریانس تغییرات متغیر x اسـت که با متغیر y تو صیف می شود. طبقه‌بندی ضریب پیر سون در جدول ۲ آورده شده است (Joinior et al., 2017).

برای محاسبه ضریب تبیین از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

ریشـه دوم میانگین خطا (RMSE) که به شـکل معادله ۶ نشـان داده می‌شـود، یکی دیگر از آماره‌هایی اسـت که معمولاً از آن برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های یک مدل در برابر مشـاهده‌ها اسـتفاده می‌شود. این آماره در واقع واریانس خطای مدل را در پیش‌بینی مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

بنابراین، هر چه مقدار این آماره به صـفر نزدیک‌تر باشـد، مدل خطای کمتری در پیش‌بینی مقادیر مشاهده‌ای خواهد داشت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{n}} \qquad \text{(۶) معادله}$$

شـاخص ME، بیش‌ترین خطا در مدل را نشـان می‌دهد که با اسـتفاده از معادله ۷ محاسـبه می‌شـود. مقدار زیاد ME نشـان‌دهنده بدترین حالت کارکرد است.

$$ME = Max\,|O_i - P_i| \qquad \text{(۷) معادله}$$

که در این معادله‌ها، O_i و P_i: مقدار مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده، $\bar{O}$: میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n: تعداد داده‌ها یا طول سری زمانی است.

نتایج و بحث

ارزیابی متغیرهای اقلیمی

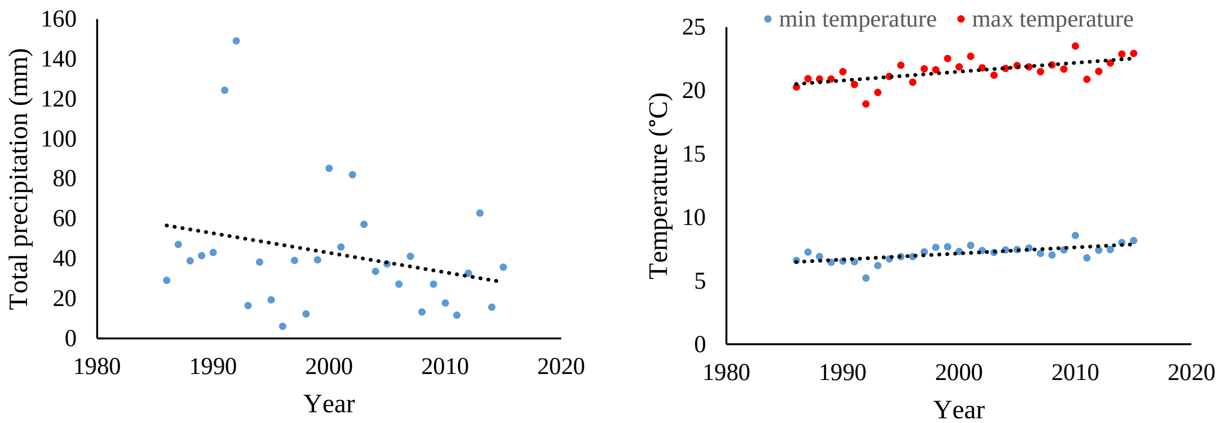
شـکل ۲ میانگین نوسـانات سـالانه مؤلفه‌های اقلیمی طی بازه ۲۰۱۵-۱۹۸۶ را برای ایسـتگاه قزوین نشـان می‌دهد. دمای حداقل و حداکثر با شـیب نسـبتاً ملایمی طی این سـال‌ها افزایش و از طرف دیگر، مقدار بارش روند کاهشی داشته است.

جدول ۲- تقسیم‌بندی نتایج شبیه‌سازی ضریب پیرسون

Table 2- Classification of Pearson coefficient

نتایج تخمین Estimation result	بدون همبستگی Not correlated	ضعیف Weak	متوسط Moderate	قوی Strong
R^2	**<0.1**	**0.1 to 0.2**	**0.2 to 0.5**	**>0.5**

1- Determination coefficient
2- Root mean square error
3- Maximum error



شکل ۲- تغییرات مؤلفه‌های بارش و حداقل و حداکثر دما طی سال‌های ۲۰۱۵- ۱۹۸۶

Fig. 2- Precipitation and minimum and maximum temperature changes during the years 1986-2015

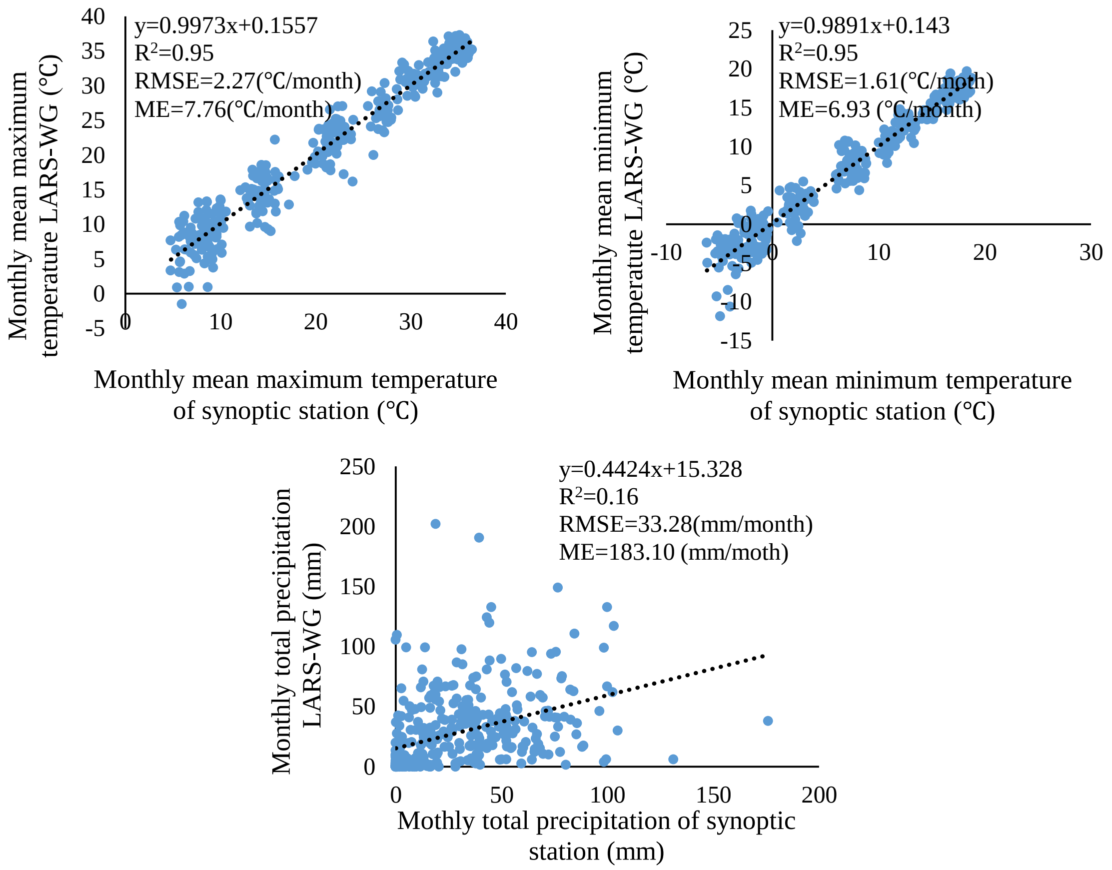
برای ارزیابی، از مدل‌های گردش عمومی موجود در مدل -LARS WG (EC-Earth، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIROC5، MPI-ESM-MR) و ســناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره پایه ۲۰۱۵- ۱۹۸۶ اسـتفاده شـد. نیاز آبی و عملکرد گندم در دوره پایه و دوره‌های آتی با نرم‌افزار Aqua Crop محاسبه شد.

نتایج ارزیابی داده های بارش، دمای حداقل و حداکثر ایســتگاه سینوپتیک قزوین و شبیه سازی شده با مدل LARS-WG در دوره پایه (۲۰۱۵- ۱۹۸۶) در شکل ۳ آورده شده است.

ضریب تبیین برای دمای حداکثر و حداقل شبیه‌سازی شده با مدل LARS-WG در شکل ۳ نشان می‌دهد که داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های ایستگاه سینوپتیک همبستگی بالایی دارند. مقدار ضریب تبیین بیش از ۹۰ درصد نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد واریانس موجود در داده‌های دمای حداقل و حداکثر ایســتگاه ســینوپتیک با داده‌های مدل LARS-WG توصیف می‌شود. مقدار RMSE در دمای حداقل و حداکثر کمتر از سه درجه سانتی‌گراد است که بیانگر انحراف کم دمای شبیه سازی شده با مدل LARS-WG در مقایسه با دمای واقعی است. مقدار شاخص ME برای دمای حداقل برابر ۶/۹۳ (درجه ســـانتی‌گراد بر ماه) و برای دمای حداکثر برابر ۷/۷۶ (در جه سانتی‌گراد بر ماه) به‌دست آمد.

ضریب تبیین برای بارش شبیه سازی شده با مدل LARS-WG در شکل ۳ نشان می‌دهد که داده‌های شبیه سازی شده و داده‌های ایستگاه سینوپتیک همبستگی بالایی ندارند و ضریب تبیین به‌کمتر از ۰/۵ کاهش می یابد. مقدار RMSE و ME به‌ترتیب برابر ۳۳/۲۸ (میلی‌متر بر ماه) و ۱۸۳/۱۰ (میلی‌متر بر ماه) به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که مدل در شبیه سازی دمای حداقل و حداکثر دقت بیشتری نسـبت به بارش دارد. در پژوهشـی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و SDSM در شـبیه‌سـازی تغییرات اقلیمی در حوضـه آبریز دریاچه ارومیه بررسـی کردند. نتایج حاصـل نشـان داد که هر دو مدل در شبیه‌سازی دما دقت بیشتری نسبت به بارش دارند که با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد (Goudarzi et al.,2015).

درصـــد تغییرات دمای حداقل، حداکثر و بارش در دوه‌های آتی نسبت به دوره پایه در جداول ۳ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۳- نتایج ارزیابی ماهانه مجموع بارش، میانگین دمای حداقل و حداکثر ایستگاه سینوپتیک قزوین و شبیه‌سازی شده با مدل LARS-WG در دوره پایه (۲۰۱۵ -۱۹۸٦)

Fig. 3- Results of monthly evaluation of total precipitation, mean minimum and maximum temperature of Qazvin synoptic station and simulated with LARS-WG model in the baseline (1986-2015)

جدول ۳- درصد تغییرات دمای حداقل تحت سه سناریو و دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸٦)

Table 3- Percentage of minimum temperature changes under the three scenarios and future periods compared to the base period (1986-2015)

مدل‌های گردش عمومی GCMs	سناریوها Scenario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
EC-EARTH	RCP4.50	13.03	23.14	29.17	28.29
	RCP8.50	12.94	27.86	45.45	44.56
GFDL-CM3	RCP4.50	19.48	30.80	39.01	38.13
	RCP8.50	24.64	37.17	55.75	54.88
HadGEM2-ES	RCP2.60	19.18	26.03	24.05	23.17
	RCP4.50	16.44	26.95	37.83	36.95
	RCP8.50	21.47	36.28	57.93	57.06
MIROC5	RCP4.50	12.13	21.11	26.19	25.31
	RCP8.50	12.25	27.51	42.00	41.13
MPI-ESM-MR	RCP4.50	13.15	21.54	28.95	28.08
	RCP8.50	15.59	31.03	47.87	47.00

جدول ٤- درصد تغییرات دمای حداکثر تحت سه سناریو و دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۵- ۱۹۸٦)

Table 4- Percentage of maximum temperature changes under the three scenarios and future periods compared to the base period (1986-1986)

مدل‌های گردش عمومی GCMs	سناریوها Scenario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
EC-EARTH	RCP4.50	4.08	7.46	9.48	9.44
	RCP8.50	4.04	9.06	14.91	14.87
GFDL-CM3	RCP4.50	8.24	13.65	17.23	17.18
	RCP8.50	10.33	16.60	24.59	24.53
HadGEM2-ES	RCP2.60	7.14	10.72	9.09	9.03
	RCP4.50	6.89	10.43	15.95	15.90
	RCP8.50	8.47	14.67	23.17	23.12
MIROC5	RCP4.50	4.94	8.32	11.37	11.31
	RCP8.50	4.00	10.72	15.97	15.91
MPI-ESM-MR	RCP4.50	5.82	8.10	11.77	11.72
	RCP8.50	6.05	11.78	18.90	18.86

جدول ٥- درصد تغییرات بارش تحت سه سناریو و دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۵- ۱۹۸٦)

Table 5- Percentage of precipitation changes under the three scenarios and future periods compared to the base period (1986-2015)

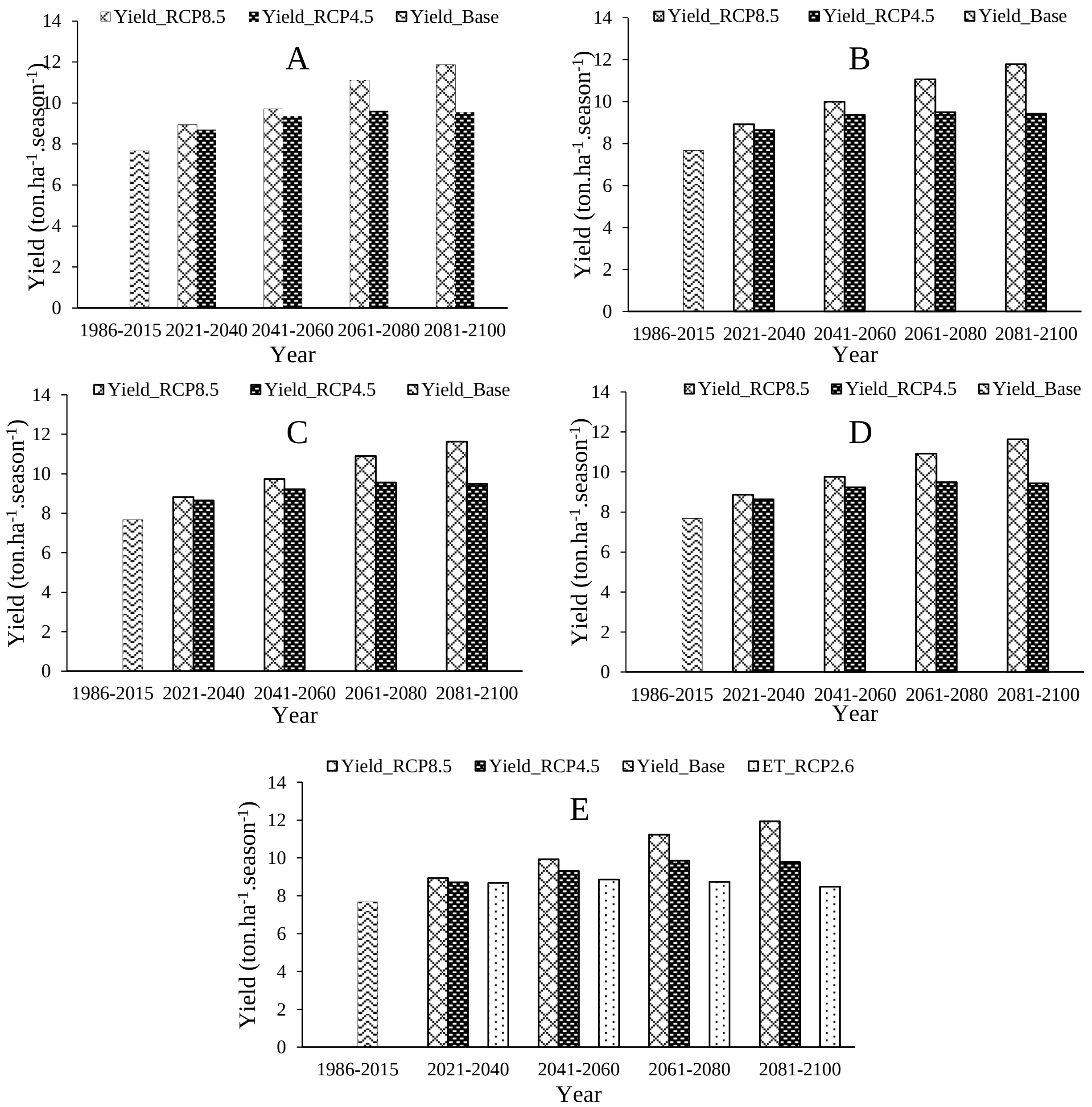
مدل‌های گردش عمومی GCMs	سناریوها Scenario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
EC-EARTH	RCP4.50	9.73	10.70	13.86	0.34
	RCP8.50	11.28	16.69	12.03	-1.31
GFDL-CM3	RCP4.50	4.03	0.37	-3.65	-16.11
	RCP8.50	0.53	-0.05	-2.04	-13.44
HadGEM2-ES	RCP2.60	17.72	12.84	22.93	9.02
	RCP4.50	9.24	25.72	18.92	5.05
	RCP8.50	7.39	12.00	17.98	4.12
MIROC5	RCP4.50	4.71	14.23	0.71	-10.63
	RCP8.50	15.92	7.21	11.85	-1.13
MPI-ESM-MR	RCP4.50	-4.02	8.01	-1.83	-13.51
	RCP8.50	7.61	-3.01	-7.12	-17.49

نتایج جدول۳ نشـــان می‌دهد که دمای حداقل در همه مدل‌های (EC-Earth، HadGEM2-ES، MIROC5، GFDL-CM3 و MPI-ESM-MR) مورد بررســی تحت هر ســه ســناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) در دوره‌های آتی (۲۱۰۰-۲۰۸۰، ۲۰۸۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۲۱) نســـبت به دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸۶) افزایش می‌یابد و بیشترین در صد تغییرات در مدل HadGEM2-ES تحت سناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ محاسبه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که دمای حداکثر در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه افزایش می یابد و بیشـــترین درصـــد تغییرات در مدل GFDL-CM3 تحت ســـناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ حاصـل شـد. نتایج جدول ۵ نشـان می‌دهد که درصـد تغییرات بارش شبیه سازی شده در مدل‌های متخلف و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره های آتی نســـبت به دوره پایه بین ۲۵/۷۲ تا ۱۷/۴۹- درصـــد متغیر اســـت. در پژوهشـــی برای بررســـی تغییرات دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعت آفتابی همدان در دوره ۲۰۶۵- ۲۰۴۶ از مدل LARS-WG و ســناریوهای A_2، A_1B و B_1 استفاده کردند. نتایج نشان داد که دمای حداقل و حداکثر افزایش می‌یابد و تغییرات بارش، هم به‌صـــورت افزایشـــی و هم به‌صـــورت کاهشی برآورد شد (Asadi et al., 2020) که با نتیجه مطالعه حاضر همخوانی دارد.

ارزیابی عملکرد و نیاز آبی گندم

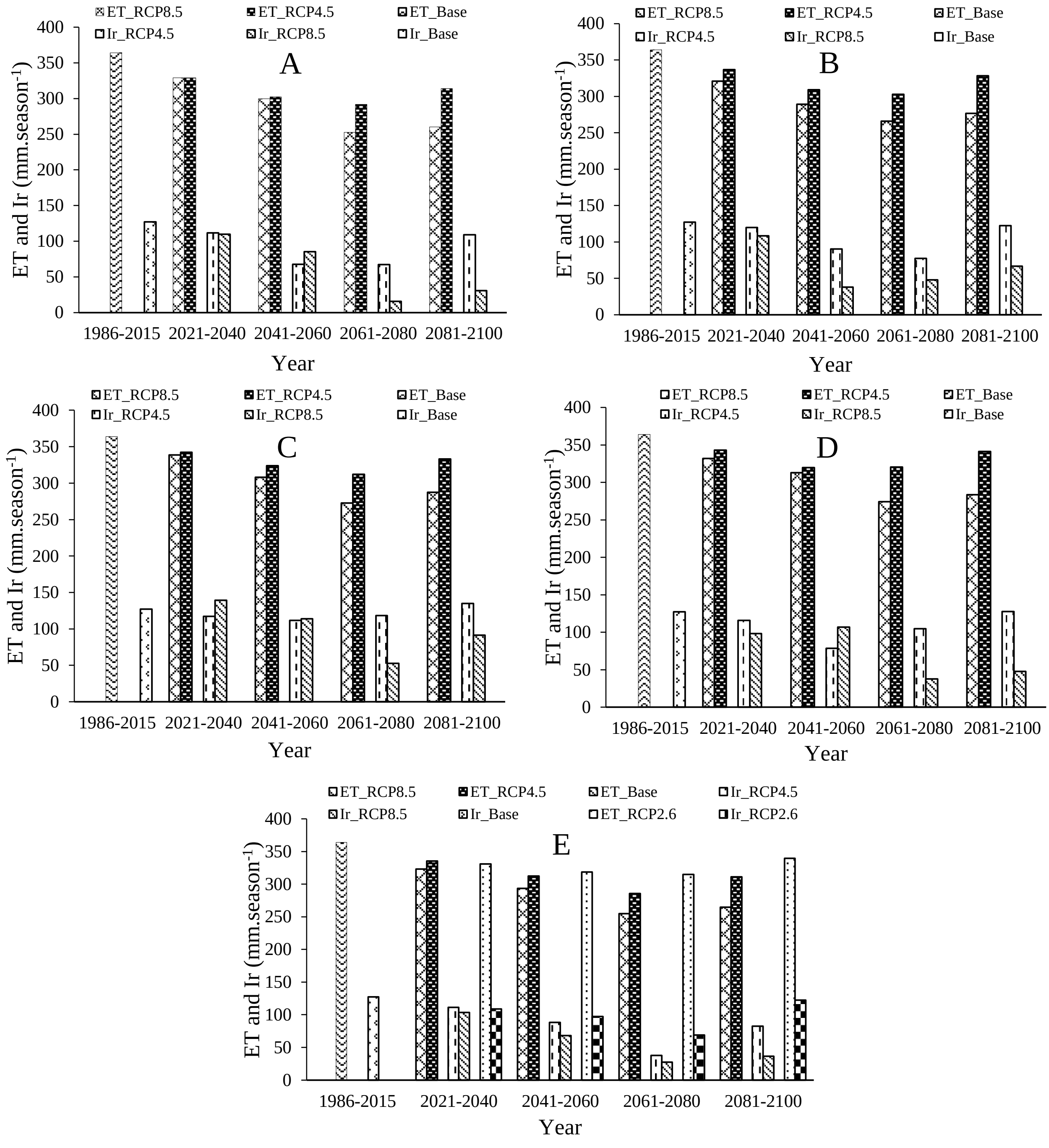
آنالیز حساسیت موضعی مدل Aqua Crop برای محصول گندم در دشت قزوین (Adabi et al., 2020)، واسنجی این مدل (Kamali et al., 2016) و کالیبراسیون مدل LARS-WG در دشت قزوین (Akbari et al., 2019) توسط محققان صورت گرفته و به همین دلیل در این مطالعه به آنالیز حساسیت و واسنجی پرداخته نشده است.

برای برآورد عملکرد و نیاز آبی در دوره‌های آتی از داده‌های بارش و دما پیش‌بینی شده مدل LARS-WG6 و دی‌اکسید کربن سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 موجود در مدل Aqua Crop استفاده شد.



شکل ٤- الف) نتایج میانگین سالانه عملکرد گندم مدل EC-EARTCH، ب) نتایج میانگین سالانه عملکرد گندم مدل GFDL-CM3، ج) نتایج میانگین سالانه عملکرد گندم مدل MPI-ESM-MR، د) نتایج میانگین سالانه عملکرد گندم مدل MIROC5 و ه) نتایج میانگین سالانه عملکرد گندم مدل HadGEM2-ES برای بازه‌های (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، (۲۰۶۰-۲۰۴۱)، (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و (۲۱۰۰-۲۰۸۱)

Fig. 4- A) Results of annual mean yield EC-EARTCH model, B) Results of mean annual yield GFDL-CM3 model, C) Results of mean annual yield MPI-ESM-MR model, D) Results of mean annual yield MIROC5 model, and E) Results of mean annual yield HadGEM2-ES model for the periods (2021-2040), (2041-2060), (2061-2080) and (2081-2100)



شکل ۵- الف) نتایج میانگین سالانه نیاز آبی و تبخیر تعرق گندم مدل EC-EARTCH، ب) نتایج میانگین سالانه نیاز آبی و تبخیر تعرق گندم مدل GFDL-CM3، ج) نتایج میانگین سالانه نیاز آبی و تبخیر تعرق گندم مدل MPI-ESM-MR، د) نتایج میانگین سالانه نیاز آبی گندم و تبخیر تعرق مدل MIROC5 و ه) نتایج میانگین سالانه نیاز آبی و تبخیر تعرق گندم مدل HadGEM2-ES برای بازه‌های (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، (۲۰۶۰-۲۰۴۱)، (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و (۲۱۰۰-۲۰۸۱)

Fig. 5- A) Results of the mean annual water requirement and evapotranspiration EC-EARTCH model, B) Results of mean annual water requirement and evapotranspiration GFDL-CM3 model, C) Results of mean annual water requirement and evapotranspiration MPI-ESM-MR model, D) Results of mean annual water requirement and evapotranspiration MIROC5H model and E) Results mean annual water requirement and evapotranspiration HadGEM2-ES model for the periods (2021-2040), (2041-2060), (2061-2080) and (2081-2100)

نتایج عملکرد، تبخیر تعرق و نیاز آبی گندم برآورد شـــده با مدل Aqua Crop در ایســـتگاه ســـینوپتیک قزوین برای ســـناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و مدل های گردش عمومی موجود در مدل LARS-WG (EC-Earth، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIROC5، MPI-ESM-MR) در دوره‌های آتی ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در شـــکل های ۴ و ۵ آورده شده است.

میانگین عملکرد گندم برای دوره پایه ۷/۶۷ (تن بر هکتار بر فصل) به‌دست آمد. میانگین عملکرد در دوره‌های آتی افزایش می‌یابد که این میزان در مدل HadGEM2-ES با سناریوی RCP8.5 و دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ بیشـــترین مقدار را دارد. نیاز آبی در دوره پایه ۱۲۷/۱۴ (میلی‌متر بر فصـــل) به‌دســـت آمد. میانگین نیاز آبی در دوره‌های آتی کاهش می یابد. حداکثر عملکرد گندم در دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸۶) ۸/۵۹ (تن بر هکتار بر فصـــل) بود و حداکثر عملکرد گندم پیش‌بینی شده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و مدل MIROC5 با سناریوی RCP8.5 برابر ۹/۸۶ (تن بر هکتار بر فصل)، در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و GFDL-CM3 با ســناریوی RCP8.5 برابر ۱۰/۵۰ (تن بر هکتار بر فصـــل)، و در دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ و مدل HadGEM2-ES با سناریوی RCP8.5 به‌ترتیب برابر ۱۱/۷۸ و ۱۲/۲۹ (تن بر هکتار بر فصـــل) برآورد شـــد. حداقل عملکرد گندم در دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸۶) ۶/۹۶ (تن بر هکتار بر فصـــل) به‌دســـت آمد و حداقل عملکرد گندم پیش‌بینی شده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و مدل MIROC5 با سناریوی RCP4.5 برابر ۸/۲۲ (تن بر هکتار بر فصـــل) و در دوره‌های ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ و مدل HadGEM2-ES با ســناریوی RCP2.6 به‌ترتیب برابر ۸/۵۶، ۸/۴۰ و ۸/۲۸ (تن بر هکتار بر فصل) حساب شده است. میزان میانگین تبخیر تعرق در دوره پایه ۳۱۳/۳۴ میلی‌متر بود. نتایج نشـــان می‌دهد که تبخیر تعرق در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ افزایش می یابد. در دوره های ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ تبخیر تعرق هم به‌صـــورت افزایشـــی و هم به‌صـــورت کاهشـــی دیده شـــد. در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱، مدل EC-EARTH با سناریوی RCP8.5 بیشترین درصد تغییرات برآورد تبخیر تعرق گندم را داشـــته اســـت. حداکثر تبخیر تعرق دوره پایه ۳۶۴ (میلی‌متر بر فصـــل) بود و حداکثر تبخیر تعرق پیش‌بینی شـده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و مدل MIROC5 با ســـناریوی RCP4.5 برابر ۳۹۴ (میلی‌متر بر فصـــل)، در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و مدل MPI-ESM-MR با سناریوی RCP4.5 برابر ۳۶۶ (میلی‌متر بر فصل)، در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و مدل MIROC5 با ســناریوی RCP4.5 برابر ۳۵۴ (میلی‌متر بر فصـــل) و دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ و مدل MIROC5 با ســـناریوی RCP4.5 و مدل HadGEM2-ES با سناریوی RCP2.6 برابر ۳۸۳ (میلی‌متر بر فصـل) محاسـبه شـد. یکی از دلایلی که نیاز آبی کاهش پیدا کرده اسـت افزایش درصـد بارندگی در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ اسـت. در صد تبخیر تعرق در این دوره افزایشی بوده، امّا به‌دلیل آنکه در صد بارندگی بیشتر بوده در نتیجه، نیاز آبی کاهشی شده است.

در پژوهشی که در برآورد نیاز آبی گندم زمستانه دشت گرگان در شرایط تغییر اقلیم انجام دادند، مقدار نیاز آبی گندم زمستانه بر اساس هر ســه ســناریوی انتشــار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش داشته است که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد (Arefinia et al., 2020). در پژوهشی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی در استان خراسان رضوی پرداختند (Zeinali Mobarakeh et al., 2019). نتایج آن‌ها نشـــان داد که اگر تغییرات اقلیمی در آینده با افزایش غلظت دی‌اکســـید کربن همراه باشـــد اثرات منفی اقلیمی از جمله افزایش دما و کاهش بارندگی بر رشد و گندم در استان خراسان رضـوی خنثی گردیده و موجب افزایش عملکرد و کارایی مصـرف آب گندم می‌شـــود. غلظت دی‌اکســـید کربن یک متغیر مهم مورد نیاز در شبیه سازی رشد گیاهان C_3 است. افزایش غلظت دی‌اکسید کربن علی‌رغم نقش مســـتقیمی که در تغییرات اقلیمی دارد، به‌دلیل افزایش فتوســنتز، کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه، کاهش تعرق از ســطح برگ موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری آب گیاهان زراعی می‌شـــود (Burkart et al., 2011).

نتایج ارزیابی درصد تغییرات عملکرد، نیاز آبی گندم و تبخیر تعرق در جدول ۶ تا ۸ آورده شده است.

جدول ٦- درصد تغییرات عملکرد گندم در ایستگاه سینوپتیک قزوین تحت سه سناریو و چهار دوره آتی در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸٦)

Table 6- Percentage of changes in wheat yield in Qazvin synoptic station under three scenarios and four future periods compared to the baseline (1986-2015)

مدل‌های گردش عمومی GCMs	سناریوها scenario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
EC-EARTH	RCP4.5	13.41	21.90	25.46	24.60
	RCP8.5	16.68	26.55	44.94	54.71
GFDL-CM3	RCP4.5	12.60	22.24	23.83	22.93
	RCP8.5	16.46	30.36	44.32	53.66
HadGEM2-ES	RCP2.6	13.11	15.41	13.95	10.54
	RCP4.5	13.44	21.32	28.43	27.42
	RCP8.5	16.54	29.46	46.43	55.68
MIROC5	RCP4.5	12.57	20.40	23.71	22.91
	RCP8.5	15.47	27.28	42.23	51.62
MPI-ESM-MR	RCP4.5	12.76	20.07	24.61	23.63
	RCP8.5	15.07	26.96	42.11	51.47

جدول ۷- درصد تغییرات نیاز آبی گندم در ایستگاه سینوپتیک قزوین تحت سه سناریو و چهار دوره آتی در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸٦)

Table 7- Percentage of changes in wheat water requirement in Qazvin synoptic station under three scenarios and four future periods compared to the baseline (1986-2015)

مدل‌های گردش عمومی GCMs	سناریوها scenario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
EC-EARTH	4.5	-12.22	-46.67	-47.06	-14.34
	8.5	-13.56	-32.91	-87.77	-75.97
GFDL-CM3	4.5	-5.61	-28.86	-39.04	-3.61
	8.5	-14.70	-70.15	-62.40	-47.34
HadGEM2-ES	2.6	-14.38	-23.39	-45.81	-3.69
	4.5	-12.30	-30.63	-70.27	-34.95
	8.5	-18.59	-46.32	-78.49	-71.41
MIROC5	4.5	-9.00	-38.29	-17.53	0.36
	8.5	-22.68	-16.07	-70.43	-62.56
MPI-ESM-MR	4.5	-7.66	-12.26	-6.87	6.18
	8.5	9.45	-10.53	-58.47	-28.03

جدول ۸- درصد تغییرات تبخیر و تعرق گندم در ایستگاه سینوپتیک قزوین تحت سه سناریو و چهار دوره اتی در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸٦)

Table 8- Percentage of changes in wheat evapotranspiration in Qazvin synoptic station under three scenarios and four future periods compared to the baseline (1986-2015)

مدل‌های گردش عمومی GCMs	سناریوها Scenario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
EC-EARTH	4.5	5.16	-3.22	-6.91	0.23
	8.5	5.10	-4.04	-19.42	-17.01
GFDL-CM3	4.5	7.70	-0.87	-3.29	4.80
	8.5	2.73	-7.33	-15.14	-11.65
HadGEM2-ES	2.6	5.75	2.07	0.48	8.38
	4.5	7.23	0.06	-8.87	-0.75
	8.5	3.23	-5.96	-18.70	-15.51
MIROC5	4.5	9.65	2.39	2.33	8.91
	8.5	6.05	0.04	-12.52	-9.52
MPI-ESM-MR	4.5	9.40	3.54	-0.40	6.26
	8.5	8.19	-1.34	-12.94	-8.28

نتایج نشان می‌دهد که عملکرد محصول در دوره‌های آتی افزایش می یا بد. در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ مدل EC-EARTH در سناریوی RCP8.5 بیشترین درصد تغییرات برآورد عملکرد گندم را داشته است. مدل GFDL-CM3 در سناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱

بیشـــترین میانگین عملکرد را نســـبت به دوره پایه شـــبیه‌ســـازی کرده اســـت. در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ مدل HadGEM2-ES در سناریوی RCP8.5 بیشترین درصد تغییرات برآورد عملکرد گندم را دا شته ا ست. نیاز آبی طی دوره‌های آتی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش در اکثر ســـناریوهای RCP8.5 بیشـــتر از دیگر ســـناریوها بود. یکی از دلایلی که نیاز آبی در دوره های آتی کاهش یافته، کاهش تبخیر تعرق گیاه به‌علت کاهش طول دوره ر شد می‌با شد. در پژوهشی که بر روی برآورد نیاز آبی گندم زمستانه در کشور چین انجام دادند، به نتایج م شابهی د ست یافتند که با نتایج پژوهش حا ضر هم‌خوانی دارد (Xing et al., 2018). یکی دیگر از دلایل کاهش نیاز آبی را می‌توان به کاهش هدایت روزنه‌ای نا شی از افزایش غلظت CO_2 و نیز کاهش طول فصل رشد ناشی از افزایش دما نسبت داد. در پژوهشی در بیرجند تحت شـــرایط تغییر اقلیم به این نتیجه رســـیدند که با کوتاه‌تر شـــدن طول دوره رشـــد گندم و جو، میزان نیاز آبی این دو گیاه در کل دوره ر شد ن سبت به دوره پایه کاهش می‌یابد (Rahmani et al., 2016). در پژوهشی به بررسی رخداد تغییر اقلیم و تأثی آن بر فنولوژی عملکرد گندم دیم در منطقه غرب و شـمال غرب ایران پرداختند. نتایج نشـان داد که عملکرد دا نه گ ندم ۳۵ درصـــد افزایش خوا هد داشـــت (Mohammadi et al., 2020) که با نتیجه مطالعه حاضـر هم‌خوانی دارد. حداکثر ن یاز آبی دوره پا یه (۲۰۱۵-۱۹۸۶)، ۲۷۴ (میلی‌متر بر ف صل) بود و حداکثر نیاز آبی پیش‌بینی شده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ در مدل MPI-ESM-MR با سناریوی RCP8.5 برابر ۲۶۵ (میلی‌متر بر فصل)، برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در مدل HadGEM2-ES با سناریوی RCP4.5 برابر ۱۶۷ (میلی‌متر بر فصـــل)، در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ در مدل‌های GFDL-CM3 و EC-EARTH با ســـناریوی RCP4.5 برابر ۱۶۳ (میلی‌متر بر فصـــل) و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در مدل GFDL-CM3 با ســناریوی RCP4.5 برابر ۲۵۴ (میلی‌متر بر فصـل) برآورد شد. در پژوه شی به مدل سازی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبیاری و کارایی مصـرف آب در گندم‌زارهای اسـتان خوزسـتان پرداخته شـد (Deihimfard et al., 2017). نتایج آن‌ها ن شان داد که عملکرد دانه گندم در شـــرایط تغییر اقلیم نســـبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و با توجه به افزایش دما و افزایش غلظت CO_2، کاهش رشـــد و کاهش تبخیر و تعرق نیاز آبی در شرایط تغییر اقلیم کاهش می‌یابد که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی ماهانه دمای حداقل و حداکثر و بارش دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸۶) و شـبیه‌سـازی شـده با مدل LARS-WG پرداخته شـــد. نتایج نشـــان داد که داده‌های دمای حداقل و حداکثر شبیه‌سازی شده و داده‌های ایستگاه سینوپتیک همبستگی بالایی دارند و ضـــریب تبیین در دوره پایه بیش از ۹۰ درصـــد به‌دســـت آمد. برای متغیرهای دمای حداقل و حداکثر، مقدار RMSE کمتر از ســـه (درجه سانتی‌گراد بر ماه) محا سبه شد. ضریب تبیین برای بارش شبیه سازی شده با مدل LARS-WG ن شان داد که داده‌های شبیه سازی شده و داده‌های ایستگاه سینوپتیک همبستگی بالایی ندارند و ضریب تبیین به کمتر از نیم کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، ارزیابی آماری نشان داد که مدل در شبیه سازی دمای حداقل و حداکثر دقت بی شتری ن سبت به بارش دارد. همچنین برای برآورد عملکرد و نیاز آبی در دوره‌های آتی از داده های بارش و د ما پیش‌بینی شـــده مدل LARS-WG6 و دی‌اکسید کربن سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 موجود در مدل Aqua Crop اسـتفاده شـد. میانگین عملکرد گندم برای دوره پایه ۷/۶۷ (تن بر هکتار بر فصـــل) به‌دســـت آمد. میانگین عملکرد در دوره های آتی افزایش می یابد که این میزان در مدل HadGEM2-ES با سناریوی RCP8.5 و دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ بیشترین مقدار را دارد. نیاز آبی در دوره پایه ۱۲۷/۱۴ (میلی‌متر بر فصل) به‌دست آمد. میانگین نیاز آبی در دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. در کل می‌توان بیان کرد که در دوره های آتی عملکرد گندم در دشـــت قزوین افزایش و نیاز آبی کاهش می‌یابد. غلظت دی‌اکســـید کربن یک متغیر مهم مورد نیاز در شبیه سازی ر شد گیاهان C_3 ا ست. افزایش غلظت دی‌اک سید کربن علی‌رغم نقش مســـتقیمی که در تغییرات اقلیمی دارد، به‌دلیل افزایش فتوســـنتز، کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش تعرق از ســـطح برگ موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری آب گیاهان زراعی می‌شـــود. نتایج تحقیق حاضـــر در رابطه با تأثیر شـــرایط تغییر اقلیم آینده بر عملکرد و نیاز آبی گندم در دشت قزوین می‌تواند ابزار سودمندی برای مدیران، کار شنا سان، برنامه‌ریزان و سیا ست‌گذاران بخش آب به‌منظور مدیریت صحیح و پایدار منابع آب و در راستای توسعه کشاورزی باشد.

Refrences

Adabi, V., Azizian, A., Ramezani Etedali, H., Kaviani, and A., Ababaei, B., 2020. Local swnsitivity analysis of Aqua Crop model for wheat and maize in plain and Moghan Pars-Abad in Iran. Iranian Journal of Irrigation and Derainage 6(13): 1565-1579. (In Persian with English Summary)

Akbari, M., Najafi Alamdalo, H., and Mosavi, S.H., 2019. Impacts of climate change and drought on imcome risk and crop pattern in Qazvin plain irrigation network. Journal of Water Research in Agriculture 33(2): 265-282. DOI:10.22092/JWRA.2019.119742 .(In Persian with English Summary)

Arefinia, A., Ahmadali, K., and Nasiri Mirian, M., 2020. Estimation of water requirement of winter wheat in Gorgan plain in the conditions of climate change. Iranian Soil and Water Research 51(7): 1868-1857. (In Persian with English Summary)

Asadi, M., Zarabianeh, H., Delavar, N., and Asadi, A., 2020. The effect of climate change phenomenon on climate parameters of Hamedan. Environmental Science and Technology 21(9): 1-14. (In Persian with English Summary)

Azuara, J., Howitt, R., MacEwan, D., and Lund, J., 2011. Economic impacts of climate-related changes to California agriculture. Journal of Climatic Change 109: 387-405.

Babolhakami, A., Gholami-Sefidkoohi, M., and Emadi, M., 2020. The effect of climate change on the evaporation of reference transpiration in Mazandaran province. Iranian Soil and Water Research 51(2): 387-401. (In Persian with English Summary)

Burkart, S., Manderscheid, R., Wittich, K.P., Löpmeier, F., and Weigel, H.J., 2011. Elevated CO_2 effects on canopy andsoil water flux parameters measured using a large chamber in crops grown with free-air CO_2 enrichment. Plant Biol (Stuttg)13: 258-269. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2010.00360.x

Deihimfard, D., Eyni Nargeseh, H., and Farshadi, S., 2017. Modeling the effects of climate change on irrigation requirement and water use efficiency of wheat fields of Khuzestan province. Journal of Water and Soil 31(4): 1015-1030.

Eyshi Rezaie, E., and Bannayan, M., 2012. Rainfed wheat yields under climate change in Northeastern Iran. Meteorological Application 19: 346-354.

Goudarzi, M., Salahi, B., and Hosseini, S.A., 2015. Performance assessment of LARS-WG and SDSM Downscaling Models in simulation of climate changes in Urmia Lake Basin. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering 9(31):11-22. (In Persian with English Summary)

IPCC. Summary for policymakers. In: Climate Change. 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. pp. 1-32.

Jalali, M., Sarai Tabrizi, M., and Babazadeh, H., 2020. Investigation of the effect of climate change on runoff and water balance of Latian dam catchment using SWAT model. Echo Hydrology 7(1): 17-28. (In Persian with English Summary)

Janjua, P.Z., Samad, G., and Khan, N., 2014. Climate change and wheat production in Pakistan. Autoregressive distributed lag approach. NJAS – Wageningen. Journal of Life Sciences (68): 13-19.

Joinior, W., Loireau, M., Fargette, M., Filho, B., and Wele, A., 2017. Correlation between soil erodibility and satellite data on areas of current desertification: A case study in Senegal. *Ciência & Trópico*. 42(2): 51-66.

Kamali, B., Ramezani Etedali, H., and Sotoodehnia, A., 2016. Determining appropriate time for rainfed lentil sowing and supplementary irrigation in Qazvin's Plain using AquaCrop Model. Iranian Journal of Irrigation and Derainage 5(10): 613-621. (In Persian with English Summary)

Karimi, T., Stöckle, C., Higgins, S., and Nelson, R., 2017. Climate change and dryland wheat systems in the US Pacific Northwest. Agricultural Systems. 159: 144-156. DOI.org/10.1016/j.agsy.2017.03.014

Kemfert, C., 2009. Climate protection requirements the economic impact of climate change. Bausch & Burkhard Schwenker (ed.), Handbook Utility Management, chapter 42, 725-739. doi.org/10.1007/978-3-540-79349-6_42.

Khaliliaqdam, N., Masaedi, A., Soltani, A., and Kamkar, B., 2012. Evaluation of the ability of LARS-WG model in predicting some atmospheric parameters of Sanandaj. Journal of Soil and Water Conservation Research (4)19: 122-85. (In Persian with English Summary)

Koohi, M., Shirmohammadi, Z., Khani, A., Mohammadian, A., and Habibi-Nokhandan, H., 2020. Spatial-temporal distribution of reference temperature and evapotranspiration using CRU data in Khorasan Razavi and predicting future

changes based on CMIP5 climate models. Remote Sensing and GIS Iran 12(1): 72-55. (In Persian with English Summary)

Ludwig, F., and Asseng, S., 2008. Impacts and adaptation to climate change in Western Australian wheat cropping systems. Agricultural Systems, 90: 159-179.

Lv, Z., Lio, X., Cao, W., and Zhu, Y., 2013. Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China. Agricultural of Forest Meteorology 171: 234-248.

Mohammadi, E., Movahedi, S., Mohammadi, R., and Golgari, S. 2020. Investigation of climate change occurrence and its impact on dryland wheat yield phenology in the West and Northwest of Iran. Climatological Research. 11(43): 159-170. (In Persian with English Summary)

Nazari., R., and Kaviani., A., 2016. Evaluation of potential evaporation and transpiration methods and evaporation pan with elysimeter values in a semi-arid climate (Case study: Qazvin plain). Echo Hydrology 3(1): 19-30. (In Persian with English Summary)

Nikbakhtshahbazi, A., 2018. Investigation of precipitation changes and evapotranspiration of agricultural products in Khuzestan province under the influence of climate change. Water and Soil Conservation Research 25(6): 139-123. (In Persian with English Summary)

Rahmani, M., Jami Al-Ahmadi, M., Shahidi, A., and Hadizadeh Azghandi, M., 2016. Effects of climate change on length of growth stages and water requirement of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) (Case study: Birjand plain). Journal of Agroecology 7(4): 443-460. (In Persian with English Summary)

Reilly, J., 1999. What does climate change mean for agriculture in developing countries? A comment on Mendelsohn and Dinar. The World Bank Research Observer. (14): 295-305.

Samadi, Z., Massahbovani, A., and Madavi, M., 2007. Investigating the effect of small regression scaling methods on river flood regime. Technical workshop on the effects of climate change on water resources management. https://civilica.com/doc/115812

Soria-Ruiz, J., Fernandes-Ordonez, Y., Quijano-Carranza, A., Macías-Cervantes, J., Sauceda, P., Gonzalez, D., and Quintana, J., 2012. Remote Sensing and Simulation Model for Crop Management. Proceedings of the PIERS Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30.

Srivastava, A.K., Mboh, C.M., Zhao, G., Gaiser, T., and Ewert, F., 2018. Climate change impact under alternate realizations of climate scenarios on maize yield and biomass in Ghana. Agricultural Systems.159: 157-174. DOI.org/10.1016/j.agsy.2017.03.011

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., and Raes, D., 2012. Crop yield response to water (Vol. 1028): Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal 101(3): 426-437.

Sun, S.K., Li, C., Wu, P.T., Zhao, X.N., and Wang, Y.B., 2018. Evaluation of agricultural water demand under future climate change scenarios in the Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. Ecological Indicators 84: 811-819.

Tao, X.E., Chen, H., Xu, C.Y., Hou, Y.K., and Jie, M.X., 2015. Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China. Water Science and Engineering 8(4): 273-281.

Xing, W., Wang, W., Shao, Q., and Ding, Y., 2018. Estimating net irrigation requirements of winter wheat across Central-Eastern China under present and future climate scenarios. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 144(7): 05018005.

Zarei, K., Mohammadi, H., and Bazgir, S., 2019. Simulation of Gorgan Synoptic Station Temperature and Precipitation with RCP Scenarios. Physical Geography Research 51(4): 579-563. (In Persian with English Summary) DOI.10.22059/jphgr.2019.280943.1007378

Zeinali Mobarakeh, Z., Deihimfard, R., Kambouzia, J. 2019. Evaluation of the effects of climate change and its adaptation strategies on the performance and efficiency of water use of water wheat (Triticum aestivum): a case study of Razavi Khorasan province. Plant production research (agricultural sciences and natural resources) 26 (3): 71-87.